



Met Office

Komplexe Scherwinde

Ein White Paper von Emily Wallace

Eine Studie zu den Ursachen und der daraus resultierenden Unterbrechung der Erzeugung von Windenergie sowie ein Aufruf zur künftigen Zusammenarbeit bei der Bewältigung der negativen Auswirkungen.

Genaue Kenntnisse der zu erwartenden Windmenge sind für die Windenergiebranche von entscheidender Bedeutung, stellen aber nicht die einzige Herausforderung dar. Ganz gleich, ob es um die Schätzung der Investitionsrendite oder die Planung von Wartungsarbeiten geht: Die Planer müssen nicht nur die durchschnittliche Geschwindigkeit des Windes kennen, sondern auch dessen Variabilität.

In diesem Dokument untersuchen wir das Phänomen der Windvariabilität infolge komplexer Scherwinde (stärkere Winde unterhalb von leichteren Winden) und legen dabei besonderes Augenmerk auf Low-Level-Jets – Luftmassen, die sich mit hoher Geschwindigkeit durch die unteren Bereiche der Atmosphäre bewegen. Außerdem beschäftigen wir uns mit den Auswirkungen komplexer Scherwinde auf die Windenergiebranche, dem aktuellen Wissensstand auf diesem Gebiet und der Frage, wie wir unsere Kenntnisse erweitern können.

Welche Auswirkungen haben komplexe Scherwinde auf die Windenergiebranche?

Die Windenergiebranche ist zurzeit unerwartet häufig mit komplexen Scherwinden konfrontiert. Dies verursacht beträchtliche zusätzliche Kosten für die bereits stark belastete Branche.

Komplexe Scherwinde können schon bei der Drehung eines einzelnen Rotorblatts zu erheblichen Schwankungen der Windgeschwindigkeit führen. Da komplexe Scherwinde in der Regel zudem zusammen mit komplexen Horizontalstrukturen auftreten, können bei benachbarten Turbinen unterschiedliche Windgeschwindigkeiten auftreten. Dies führt zu unterschiedlichen Energieerzeugungspotenzialen und somit zu einer Reihe von Problemen für die Branche.

Komplexe Scherwinde erschweren die Prognosen zur Stromerzeugung. Bei Leistungskurven von Turbinen wird von einem Standard-Schwerwind am Rotor (Windgeschwindigkeiten steigen analog zur Höhe) und von einheitlichen Bedingungen für alle Turbinen eines Windparks ausgegangen. Abweichungen von diesem Standard führen häufig zu unzutreffenden Prognosen, und die nicht berücksichtigte Scherung verursacht eine geringere Energieerzeugung.

Für Betreiber von Windparks bedeuten unzutreffende Prognosen meist Zusatzkosten in Form von Strafzahlungen auf dem Day-Ahead-Markt. Unzutreffende Prognosen erschweren darüber hinaus die Planung von Wartungsarbeiten für Tage mit erwarteter Niedrigproduktion.

Für Netzbetreiber erschweren Energiefluktuationen die Gewährleistung einer ausgewogenen Stromversorgung und führen dazu, dass auf kostspielige Reserveenergie zurückgegriffen werden muss.

Scherwinde beeinträchtigen zudem die Analyse der Turbinenleistung. Garantierte Leistungskurven basieren auf der Leistung der installierten Turbine unter Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe bei Standardbedingungen sowie der Luftdichte. Turbulenzen oder Variationen der Windgeschwindigkeit am Rotor werden dabei kaum berücksichtigt. Unter bestimmten Umständen können diese Faktoren jedoch zu erheblichen Schwankungen bei der Energieerzeugung führen. Dieser Gesichtspunkt wurde durch den Arbeitskreis „Power Curve“ untersucht. Die Ergebnisse erscheinen in der neuen Fassung der Branchennorm (IEC 61400-12-1, Ausgabe 2, geplanter Veröffentlichungstermin Juli 2016). In diesem Dokument wird die Scherung anhand der Rotor-äquivalenten Windgeschwindigkeit (REWS) erfasst. Die neue Branchennorm unterstreicht den Bedarf an einem besseren Verständnis der Verbreitung komplexer Windstrukturen.

Komplexe Scherwinde, vor allem Low-Level-Jets, können zu einer Dauerbeanspruchung führen und so die Lebensdauer von Turbinenkomponenten verringern. Ingenieure sind zwar in der Lage, einige Auswirkungen komplexer Windprofile abzuschwächen, doch wenn die Häufigkeit komplexer Scherungen außer Acht gelassen wird, ist das Verschleißverhalten des Rotors schwer zu prognostizieren. Mangelnde Kenntnisse der Häufigkeit von Low-Level-Jets an einigen Standorten haben bereits zu kostspieligen und gefährlichen Bruchschäden an Rotoren geführt.

Was genau ist ein komplexer Scherwind?

Der Wind variiert sowohl räumlich als auch zeitlich. Er wird durch großangelegte Luftdruckmuster geprägt, die aus Sonnenenergie entstehen und von der Erdrotation beeinflusst werden.

Auch die Erdoberfläche hat Einfluss auf den Wind. Die Reibung zwischen der Atmosphäre und der Erdoberfläche verursacht „Scherwinde“, also Winde mit wechselnder Geschwindigkeit und Richtung im Verhältnis zur Höhe. Luft, die sich über die Erdoberfläche bewegt, ist stärkerer Reibung ausgesetzt als Luftmassen in größeren Höhen und bewegt sich daher langsamer. Dabei werden die Richtungen dieser variierenden Winde durch die Erddrehung bestimmt – die Luftmassen bewegen sich also nicht nur, um Unterschiede des Luftdrucks auszugleichen.

Einige Oberflächenstrukturen und atmosphärische Effekte erzeugen Turbulenzen, Wirbel und Low-Level-Jets, in denen die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung der Luftmassen über relativ kurze Distanzen variieren. So entstehen nicht nur Böen und Windsprünge, sondern es kann auch dazu kommen, dass oberhalb von Bereichen mit niedrigeren Windgeschwindigkeiten höhere Windgeschwindigkeiten auftreten. Ein solches atypisches und höhenabhängiges Windprofil wird als „komplexer Scherwind“ bezeichnet.

Was weiß die Branche über Scherwinde?

Der erste Schritt bei dem Versuch, das Phänomen der Windvariabilität zu begreifen, besteht in der Durchführung von Beobachtungen. Leider ist es äußerst schwierig, die wahre Natur des Windes nur auf diese Weise zu ergründen. Es sind kostspielige Untersuchungen in verschiedenen Höhen und bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten erforderlich, um ein exaktes Wind-Höhe-Profil zu erstellen. Aufzeichnungen aus Langzeitstudien von verschiedenen Standorten sind erforderlich, um ein räumliches und zeitliches Bild der komplexen Scherwinde zu zeichnen. So überrascht es nicht, dass nur wenige Windparks für die Aufzeichnung der relevanten Daten ausgerüstet sind.

Wertvolle Einblicke kann uns die Doppler-LiDAR-Methode verschaffen. Bei der LiDAR-Methode werden zur Messung von Windgeschwindigkeiten die Bewegungen von Aerosolen in der Atmosphäre mit Laserstrahlen erfasst und nachverfolgt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Beobachtungsmethoden lassen sich mit LiDAR Informationen zu Winden sammeln, die in vielen Kilometern Entfernung oder über ganze Atmosphärenstreifen hinweg auftreten. Dadurch können dreidimensionale Modelle der Winde erstellt werden, die in der unmittelbaren Umgebung eines Windparks auftreten. Zudem lassen sich komplexe Windstrukturen bildlich darstellen. Allerdings bedeutet eine größere Reichweite Abstriche bei

der Qualität der Daten: Einige LiDAR-Geräte produzieren Daten für Bereiche über mehrere Kilometer – jedoch nur mit einer Auflösung von 30 m. Andere Geräte hingegen bieten eine höhere Auflösung, sind aber in ihrer Reichweite eingeschränkt.

Mithilfe dieser Technologien konnte in einigen Beobachtungsreihen die Existenz von komplexen Windprofilen und hoher Windvariabilität nachgewiesen werden. So gelangen wir zu einem besseren Verständnis ihrer Häufigkeit und der atmosphärischen Bedingungen. Beobachtungen allein geben jedoch keinen Aufschluss darüber, wo ein komplexes Windprofil seinen Ursprung hat, welche Entfernung es seit seiner Entstehung zurückgelegt hat und unter welchen Bedingungen es entstanden ist. Aufgrund dieser Wissenslücken können die Messungsergebnisse lediglich auf den spezifischen untersuchten Standort angewendet werden.

Ein weiterer Ansatz bei der Untersuchung komplexer Scherwinde basiert auf Satellitenmessungen der Windgeschwindigkeit über der Meeresoberfläche. Die entsprechenden Daten werden mithilfe von sogenannten Scatterometern erfasst, die an den Satelliten montiert sind. Die Daten sind zwar nicht fehlerfrei, ermöglichen

Welche Erkenntnisse liefern Modellstudien?

Modellstudien sind zwar hilfreich, bieten bisher aber keine umfassende Lösung. An einigen Standorten wurden hochauflösende CFD-Modelle (Computational Fluid Dynamics) erstellt, allerdings mit begrenztem Erfolg. Mit CFD-Modellen lassen sich Strukturen erfassen, die innerhalb des Modellbereichs entstehen. Aufgrund des hohen Rechenaufwands sind diese Modelle räumlich stark begrenzt. Daher können sie keine komplexen Profile erfassen, die durch kilometerweit entfernte Strukturen und Einflüsse entstehen. Dies ist vor allem bei

Offshore-Windparks problematisch, die sich in einiger Entfernung zur Küste befinden.

Durch die Kombination von CFD- und Mesoskalen-Modellen können zwar weitere Informationen erfasst werden, doch dies ist nur dann möglich, wenn sich die relevanten Strukturen durch Mesoskalen-Modelle in einem größeren Maßstab reproduzieren lassen.

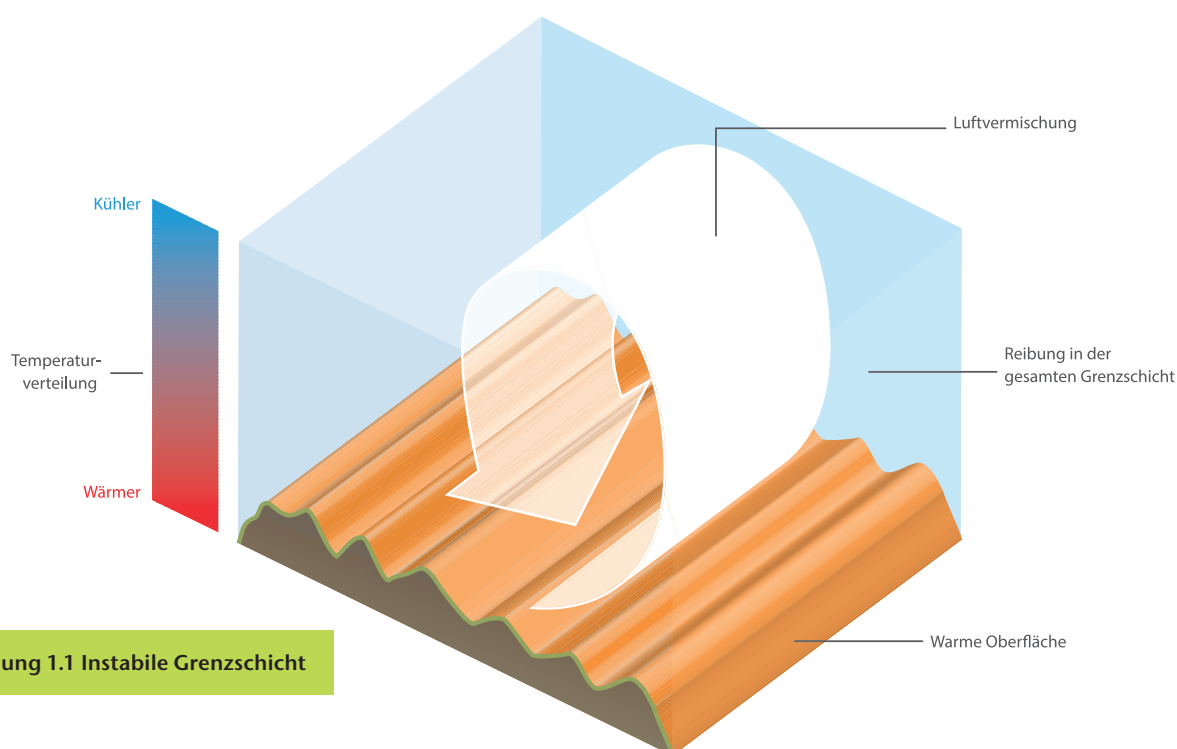


Abbildung 1.1 Instabile Grenzschicht

Was lehrt uns die Theorie über Windvariabilität, und wie spiegeln sich diese Erkenntnisse in Mesoskalen-Modellen wider?

Ohne Daten war die Branche bei der Beschreibung des Windverhaltens bisher sehr stark von theoretischen Annahmen abhängig. Dabei wurde häufig auf die Monin-Obukhov'sche Ähnlichkeitstheorie zurückgegriffen, nach der die Windgeschwindigkeit analog zur Höhe ansteigt. Da diese Theorie jedoch auf sehr spezifischen Annahmen basiert, eignet sie sich nicht zur Beschreibung kurzfristiger Windfluktuationen oder des Windverhaltens über Land in Küstennähe. Auch die Anwendung der Theorie setzt spezifische Bedingungen voraus, darunter eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit über einer ebenen Oberfläche (wie z. B. dem offenen Meer) in einem Zeitraum von mindestens zehn Minuten sowie neutrale atmosphärische Bedingungen. Die Beschreibung komplexer Terrain- und atmosphärischer Bedingungen erfordert daher detailliertere Modelle.

In einer instabilen oder konvektiven Luftmasse neigt die Luft dazu, sich aufgrund ihres Temperaturprofils vertikal zu vermischen. Bei einer solchen vertikalen Bewegung kühlt die Luft ab. In einer instabilen Luftmasse ist ein tiefer gelegenes Luftpaket, das nach oben steigt, immer noch wärmer als die umgebende Luft. Dies ist häufig tagsüber der Fall, wenn die Landoberfläche warm ist. In instabilen Luftmassen steigen wärmere Luftpakete in der Nähe der Oberfläche über höhere, kältere Luftpakete hinweg, sodass eine gemischte vertikale „Grenzschicht“ entsteht. Diese Vermischung führt dazu, dass der Reibungseffekt an der Oberfläche auf dieser Grenzschicht zum Tragen kommt und der Wind sich dem höhenabhängigen Standardmodell entsprechend verhält. (Siehe Abbildung 1.1 – Instabile Grenzschicht).

Wenn Luft sich über eine kühleren Oberfläche bewegt (z. B. über das Meer), kann sich kurz über der Oberfläche eine flache, stabile Schicht bilden. Der Reibungseffekt verdichtet sich in dieser flachen Schicht und verlangsamt somit die Windgeschwindigkeit. Die Luft oberhalb dieser stabilen Schicht wird von der Oberfläche entkoppelt und beschleunigt, sodass hohe Windgeschwindigkeiten entstehen. Dieses Phänomen wird als Jet bezeichnet (siehe Abbildung 1.2 – Stabile Grenzschicht). Werden diese Jets durch den Tageszyklus verursacht, so bezeichnet man sie als Nacht-Jets, andernfalls als Low-Level-Jets.

Seit längerer Zeit werden dynamische Modelle verwendet, um die Auswirkungen von Nacht-Jets und Low-Level-Jets zu reproduzieren, die über den Great Plains in den USA entstehen. Doch während die Ursachen und die Häufigkeit dieser Phänomene in den USA relativ gründlich erforscht wurden, liegen für Europa keine vergleichbaren Daten vor.

Das Met Office hat Modelle auf ihre Fähigkeit zur Reproduktion von Low-Level-Jets untersucht und war maßgeblich an weltweiten Studien zu Grenzschichten beteiligt, z. B. an der GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study (GABLS). [Das Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) ist ein integriertes Programm aus Forschung, Beobachtung und wissenschaftlichen Aktivitäten mit dem Ziel, globales und regionales Klima vorherzusagen.]

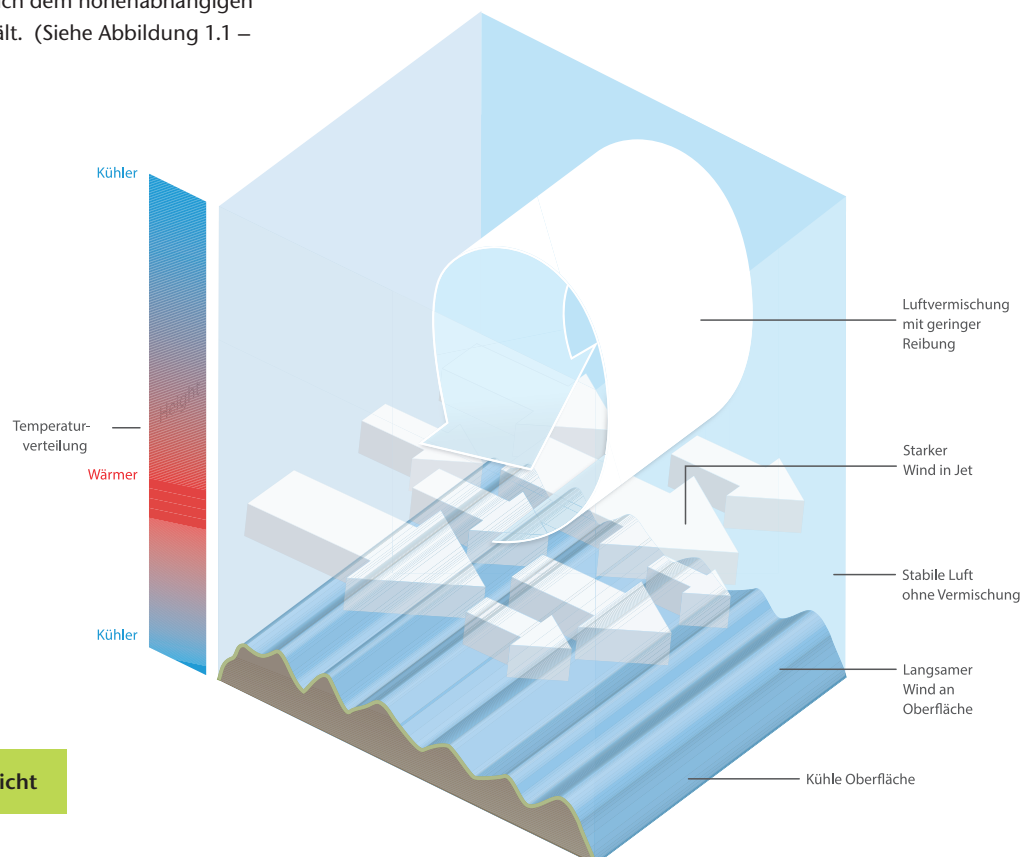


Abbildung 1.2 Stabile Grenzschicht

Experimente mithilfe des KNMI-Messmasts Cabauw in den Niederlanden zeigen die Vorteile einiger hochmoderner Modelle wie z. B. des Unified Model (UM) von Met Office zur Reproduktion des Effekts von Low-Level-Jets. Allerdings stellte sich heraus, dass Modelle über dem Meer nicht ausreichend auf Veränderungen der Meeresoberflächentemperatur reagieren. Das Met Office arbeitet zurzeit an der Verbesserung dieser Reaktion, indem es den Effekt untersucht, der bei einer Verkopplung atmosphärischer Modelle mit der Meeresoberfläche entsteht.

Auch Hindernisse auf der Oberfläche können Wirbel und Turbulenzen hervorrufen, die sich negativ auf die Windenergiebranche auswirken. Wenn Luftmassen auf einen Hügel oder eine Klippe treffen, müssen sie sich an diesem Hindernis vorbei oder darüber hinweg bewegen. Wenn sie sich darüber hinweg bewegen und die richtigen atmosphärischen Bedingungen herrschen, können sie Teil einer Schwerewellen-Oszillation werden. Dabei werden Luftpakete abhängig von ihrer Dichte relativ zur umgebenden Luft aus ihrer „natürlichen Höhe“ in der Atmosphäre nach oben verdrängt. Siehe Abbildung 2 – Schwerewellen-Oszillation.

Dies bedeutet, dass die Luftpakete dichter sind als die umgebende Luft und aufgrund der Schwerkraft nach unten sinken. Sie sinken über ihre „natürliche Höhe“ hinaus weiter, bis die physikalischen Kräfte die Bewegung ausgleichen und die Luftmassen wieder aufwärts drücken. So entsteht eine vertikale Windoszillation, die auch als Schwerewelle bezeichnet wird. Die Luft wird unterhalb der Ausläufer der vertikal oszillierenden Luft komprimiert und verursacht durch die Bewegung im beschränkten Raum Böen an der Oberfläche.

Dieser Effekt konnte mithilfe hochentwickelter NWP-Modelle nachgestellt werden und lässt sich durch die einfache „lineare Theorie“ erklären, die in Teilen der Branche verwendet wird. Nachlaufströmung, die entsteht, wenn Luft um Hügel oder andere Hindernisse herum fließt, lassen sich mit dieser einfachen Technik jedoch nicht modellieren.

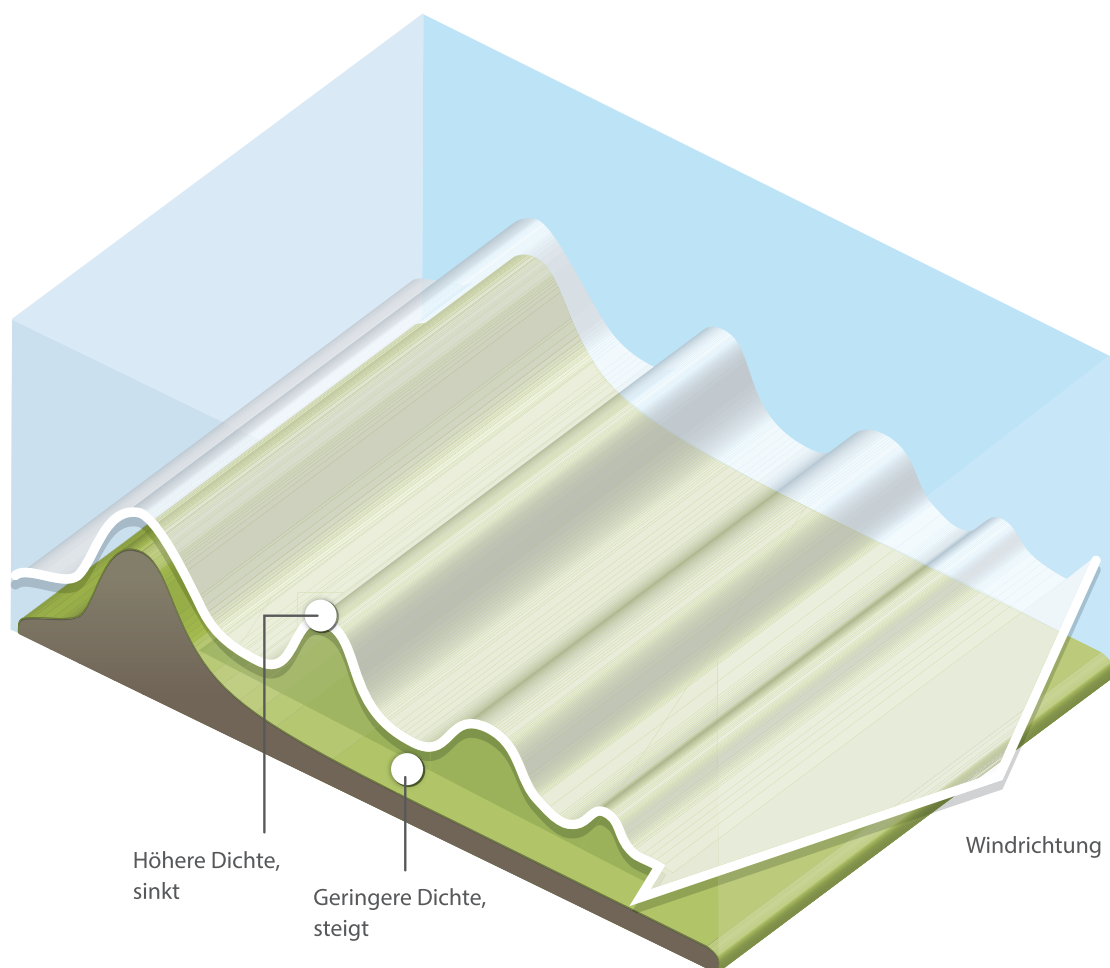


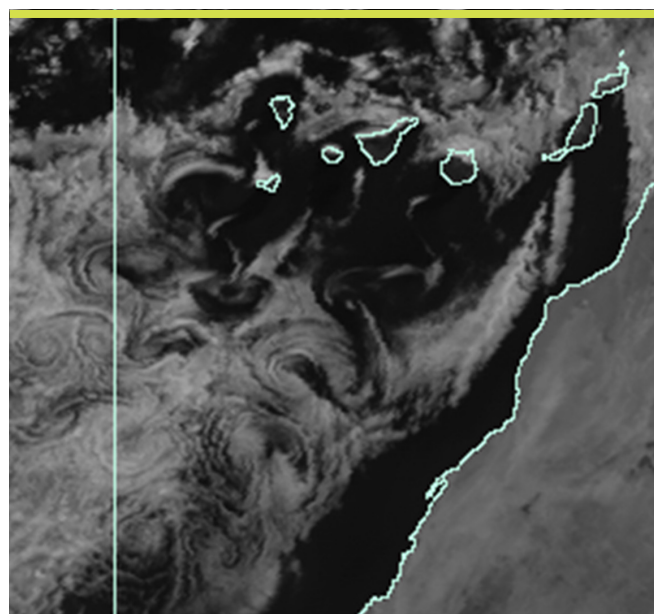
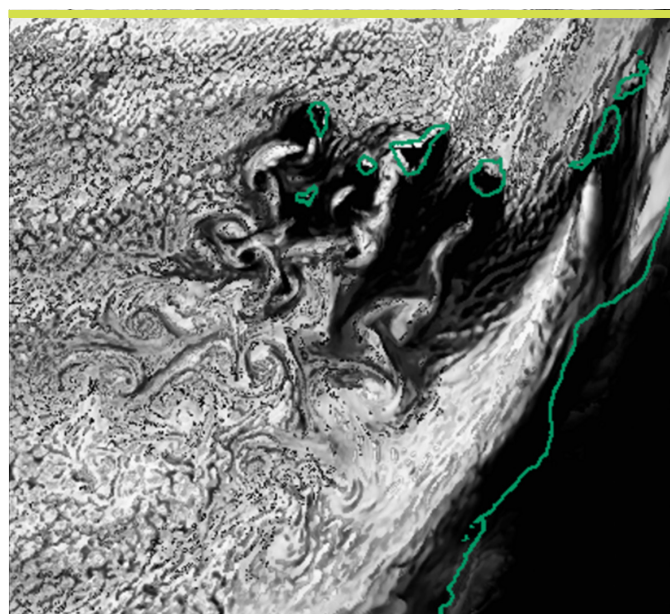
Abbildung 2 Schwerewellen-Oszillation
(in stabiler Grenzschicht)

Wenn die Luft sich nicht über ein Hindernis hinweg bewegen kann, muss sie um das Hindernis herum fließen. Dabei teilt sie sich in zwei oder mehr Teile auf. Reibungseffekte, die entstehen, wenn sich die Luft an einem Hügel vorbei bewegt oder wenn die Luftströme wieder zusammentreffen, erzeugen Turbulenzen. Es können sich sogar Wirbel vom Hauptstrom abtrennen. Dieses Phänomen wird als „Wirbelablösung“ bezeichnet. Bei einer hohen Auflösung kann dieser Vorgang mit geeigneten Mesoskalensystemen präzise modelliert werden. Ein Beispiel hierfür ist der Effekt der Turbulenzen auf das Wolkenfeld in diesem Modell des Luftstroms über den Kanarischen Inseln, ergänzt durch das entsprechende Satellitenbild (siehe Abbildung 3).

Nach einer Strömungsunterbrechung aufgrund eines der oben beschriebenen Effekte muss die Luft bis zu eine Stunde lang über eine homogene Oberfläche (z. B. das Meer) fließen, um wieder die Voraussetzungen der Monin-Obukhov'schen Ähnlichkeitstheorie zu erfüllen. Je nach Windgeschwindigkeit kann dieser Vorgang mehrere Dutzend Kilometer vor der Küste stattfinden. An Land tritt dieses Phänomen nur selten auf. Wie kann die Windenergiebranche dabei unterstützt werden, die problematischen Auswirkungen dieser komplexen Strömungen zu bewältigen?

Modelldaten aus einer UM-Simulation mit einer Auflösung von 1

Satellitenbild



Sowohl bei 1800 am 2010.06.06 gültig.

Abbildung 3 Tiefe Wolken mit Wirbelablösung über den Kanarischen Inseln.

Modell des Met Office-Wissenschaftler Stu Webster, Mitglied des Flow Over Orography Team of Atmospheric Processes and Parametrizations.

Der Blick nach vorn

Bei der Modellierung der Dynamik von Grenzschichten stehen uns zahlreiche Möglichkeiten zur Verfügung. Grenzschicht-Experten arbeiten bereits eng mit Windenergiespezialisten zusammen. Bislang gibt es jedoch keinen integrierten Ansatz zur Beantwortung der dringlichsten Frage. Die Branche muss die Position, die Häufigkeit und die Entstehungsbedingungen der vorherrschenden komplexen Windprofile kennen. Die ultimative Herausforderung besteht in der Frage, ob sich komplexe Scherwinde präzise vorhersagen lassen.

Fortschritte auf diesem Gebiet erfordern einen interdisziplinären Ansatz. Zum Verständnis komplexer Windprofile müssen die Beobachtungen der Branche mit hochentwickelten, hochauflösenden, umfassenden Modellen kombiniert werden, mit denen sich die zahlreichen negativen Effekte reproduzieren lassen.

Modelle mit einer Auflösung von 1,5 km haben bereits nachgewiesen, dass sie zur Reproduktion wichtiger Phänomene wie Low-Level-Jets, Nacht-Jets und küstennaher Turbulenzen geeignet sind. Experimente zur hochauflösenden Modellierung von Grenzschichten dauern an.

Die archivierten Prognosedaten reichen viele Jahre zurück, und es liegen Hindcast-Daten für ganz Europa vor.

Anhand von archivierten Prognosedaten, Hindcasts und Branchenbeobachtungen sollten es möglich sein, die Gebiete und Zeiträume zu ermitteln, in denen die fraglichen Ereignisse am häufigsten auftreten. Wenn wir die Ursachen der schwerwiegendsten Ereignisse besser verstehen, können wir die vorliegenden Daten gezielt nutzen, um diese Ereignisse zu modellieren und vorherzusagen.

Zutreffende Informationen über die Windvariabilität erleichtern es der Windenergiebranche, Windparks an optimalen Standorten zu errichten, Wartungsarbeiten zu geeigneten Zeitpunkten anzusetzen und dank präziserer Schätzungen Strafgeldern zu vermeiden.

Aus diesem Grund strebt das Met Office die Zusammenarbeit mit anderen Beteiligten an. Das Ziel des Projekts besteht darin, das Investitionsrisiko zu senken und Entwicklern, Betreibern und Investoren mehr Gewissheit im Hinblick auf die Energieerzeugung zu verschaffen.

Emily Wallace, August 2015



Für weitere Informationen über Windscherung oder andere Bereiche der Forschung bitte an renewables@metoffice.gov.uk